

低含量铅对镉污染下冬小麦根际微生物的影响

贾 夏, 何云华, 周春娟

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用 Biolog Eco 微生物分析法, 分析了土壤盆栽试验条件下低于国家“土壤环境质量标准”规定的 II 类土壤环境基准值每 kg 干土 350 mg (土壤 pH>7.5) 的 Pb 对 Cd 处理下冬小麦幼苗根际土壤微生物群落的影响特征。结果表明: 土壤 Pb 含量低于国家土壤环境基准值时, 会显著影响 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤微生物碳源利用率、代谢功能多样性指数及群落结构的影响特征, 主要表现为土壤低含量 Pb 增强了 Cd 对微生物利用不同碳源能力的抑制效应, 同时亦加强了 Cd 对微生物代谢功能多样性指数的影响特征; 冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性指数与根系分泌物酚酸和简单糖类之间的相关性特征在低含量 Pb-Cd 处理与 Cd 处理之间明显不同, 且相关方向和显著性水平均发生了明显变化。

关键词: 低含量 Pb; Cd 污染; 冬小麦幼苗; 根际土壤微生物群落

中图分类号: X132

文献标志码: A

Effects of Low Lead Content on Rhizosphere Microorganism of Winter Wheat Seedlings Under Stress of Cadmium

JIA Xia, HE Yunhua, ZHOU Chunjuan

(College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Biolog Eco method was used to investigate the effect of low lead content ($< 350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry weight soil, soil pH > 7.5) on the rhizosphere microbial community of potted winter wheat seedlings under the stress of cadmium. The low lead content significantly results in the shift of rhizosphere carbon source utilization of microorganisms, microbial metabolic diversity indexes, and microbial community structure in the stress of cadmium. And it mainly strengthens the inhibition of cadmium on the ability of the rhizosphere microbes to utilize different carbon resources, meanwhile it enhances the effect of cadmium on the microbial

metabolic diversity. Furthermore, the correlation between rhizosphere microbial metabolic diversity indexes and the content of simple sugars and phenolic acid exudates under Pb-Cd is obviously different from that under Cd, and the correlation direction and the significant level all change evidently.

Key words: low lead content Pb; Cd pollution; winter wheat seedlings; rhizosphere soil microbial community

目前土壤 Pb、Cd 污染严重, 且二者常相伴存在, 截止 2005 年我国 Cd 污染耕地面积已达 $1.33 \times 10^8 \text{ m}^2$ (1.33 万公顷)^[1], 土壤 Pb、Cd 污染对微生物活性、植物生长、根系分泌物等影响的研究较多^[2-3], 但 Pb 含量的选择多高于国家“土壤环境质量标准”基准值 (pH>7.5 时, 每 kg 干土 Pb 含量为 350.00 mg)。而低于基准值的 Pb 与 Cd 共存时是否会加重或减轻 Cd 对植物根际微环境的影响, 对于植物根际土壤生态系统的安全性和稳定性及土壤可持续生产力具有重要意义。小麦作为全世界重要的粮食作物, 其产量和品质影响人类饮食水平的提高和健康安全。据此, 本研究探讨了低于“国家土壤环境质量标准”II 级质量标准关于 Pb 基准值 (每 kg 干土 Pb 含量为 350.00 mg, pH>7.5) 条件下, 对 Cd 污染下冬小麦幼苗根际土壤微生物群落的影响特征, 以期为进一步评价土壤重金属污染条件下冬小麦根际土壤微生态系统的安全性和稳定性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种为小偃 22 号, 幼苗半匍匐, 分蘖力较强, 叶色浅, 叶片较长, 株高 88 cm, 株型较紧凑。

供试土壤采集于陕西西安市未央区(冬小麦产区),土壤类型为壤土,其有机质质量分数 $17.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $53.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $171.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $71.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $2.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可交换钾 $575.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可溶性盐 $0.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,Pb 背景值 $7.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 8.45.

1.2 盆栽试验设计

土壤污染处理采取向目标土壤中添加外源污染物形式,依据我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)进行土壤 Cd 和 Pb—Cd 复合处理,其中 Cd 处理设为每 kg 干土 5.0,10.0,20.0,50.0,70.0 mg,依次编号 T1,T2,T3,T4,T5;Pb—Cd 处理设为每 kg 干土 50.0~5.0,80.0~10.0,120.0~20.0,180.0~50.0,230.0~70.0 mg,依次编号 T6,T7,T8,T9,T10,对照为背景土壤,编号为 CK. 采用盆(盆高 46 cm,直径 36 cm)栽法培育冬小麦幼苗,污染土壤平衡半个月后装盆,每盆装土 15 kg,于 10 月初种植冬小麦,每盆定植 200 棵幼苗. 幼苗生长期间用自来水浇灌,使土壤水分含量达到田间最大持水量的 60%. 每处理设 3 个重复.

1.3 分析方法

1.3.1 土壤样品的采集

于幼苗生长 3 周、7 周和 12 周采用多点混合法挖取植株,抖掉根系外围土,剩余的即为根际土^[4],用毛刷刷下根表土并充分混匀后拣去细根等杂物,过 1 mm 筛,用于 Biolog Eco 微生物分析和根系分泌物分析.

1.3.2 测定项目与方法

根系分泌物分析:土壤酚酸含量的测定采用福林酚比色法^[5],土壤简单糖含量的测定采用 3,5-二硝基水杨酸法^[6].

根际微生物代谢功能多样性:根际土壤微生物代谢功能多样性采用 Biolog-Eco 微平板法进行分析,称取相当于 10 g 烘干质量的新鲜土样置无菌三角瓶,加入含 0.85% NaCl 的无菌水 90 mL,封口,200 r · min⁻¹振荡 30 min 后于冰浴中静置 2 min,取上清液 5 mL 置 100 mL 灭菌三角瓶中加入 45 mL 无菌水,重复稀释 3 次,制得体积比 1:1 000 的提取液,立即用于 ELISA 反应. 将 Biolog Eco 平板预热到 25 °C,用微量移液器取 150 μL 提取液于各孔中,28 °C 恒温培养,连续培养 240 h,每隔 12 h 用 ELISA 反应平板读数器读取 590 nm 处吸光值一次.

1.4 数据分析

1.4.1 Biolog Eco 微平板平均颜色变化率

Biolog Eco 微平板平均颜色变化率(average well color development,AWCD)为 $\sum(C-R)/N$. 其中,C 为 31 孔的吸光值,R 为对照孔吸光值,N 为碳源数.

1.4.2 代谢功能多样性指数分析

采用香农系数(H)、丰富度指数(S)和均匀度指数(E)来表征微生物群落代谢多样性. 丰富度指数(S)指被利用的碳源总数,为每孔中 $C-R>0.25$ 的孔数^[7];香农系数为 $H=-\sum(P_i \ln P_i)$, P_i 为有培养基的孔与对照孔的光密度值差与整板总差的比值,即 $P_i=(C-R)/\sum(C-R)$ ^[8];均匀度指数为 $E=H/\ln S$ ^[8].

1.4.3 根系分泌物分析

根系分泌总酚酸量为根际土壤总酚酸量与空白土壤总酚酸量之差;根系分泌简单糖类量为根际土壤简单糖量与空白土壤简单糖量之差,分析结果已于另文发表^[9].

2 结果与分析

2.1 不同处理下根际土壤微生物碳源利用率

由图 1 可知,幼苗生长 3 周时,除 10.0 mg · kg⁻¹ 外,其他 Cd 处理对根际土壤微生物利用碳源的能力表现为抑制效应;7 周时,除 10.0 和 70.0 mg · kg⁻¹ 外,其他处理表现为抑制效应;12 周时,所有 Cd 处理均表现为抑制效应.

Pb—Cd 处理时,冬小麦幼苗根际土壤微生物利用碳源的能力与单独 Cd 处理时不同,幼苗生长 3 周时,50.0,80.0 和 120.0 mg · kg⁻¹ 的 Pb 表现为增强 Cd 的抑制效应,而 180.0 和 230.0 mg · kg⁻¹ 的 Pb 减缓 Cd 的抑制效应;7 周时,除 50.0 mg · kg⁻¹ 的 Pb 可减缓 Cd 的抑制效应外,其他含量的 Pb 均增强 Cd 的影响效应,其中 Pb 质量分数为 120.0 和 230.0 mg · kg⁻¹ 时,复合处理对根际土壤微生物碳源利用能力的影响与单独 Cd 处理时相反;12 周时,除 50.0 和 230.0 mg · kg⁻¹ 外,其他含量 Pb 均增强 Cd 的抑制效应.

2.2 不同处理下根际土壤微生物代谢功能多样性

由表 1 可知,冬小麦幼苗生长 3 周时,Cd 处理下根际土壤微生物群落的香农系数增大,丰富度指数显著降低,而均匀度指数则显著增加. 7 周和 12 周时,香农系数降低,而丰富度和均匀度指数的变化特

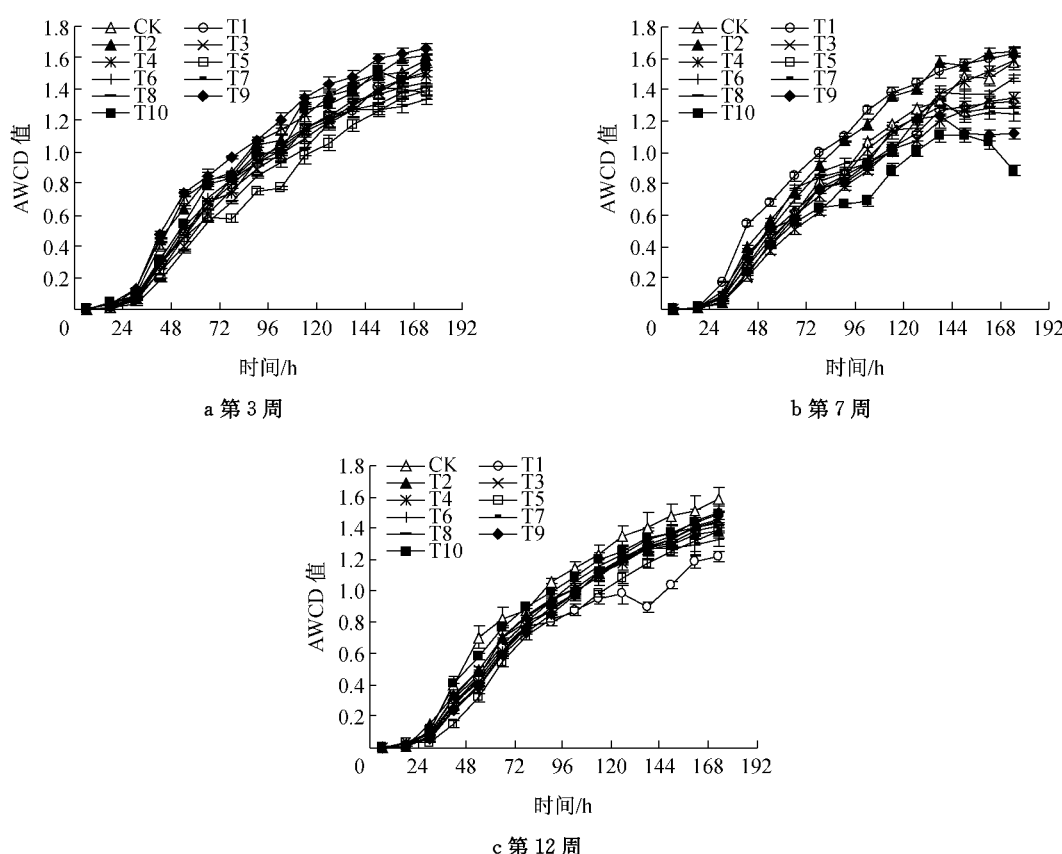


图 1 不同处理下冬小麦幼苗根际土壤微生物群落 AWCD 值随培养时间的变化

Fig.1 AWCD values of the rhizosphere soil microorganism of winter wheat seedlings by different treatments

表 1 不同处理下冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性指数

Tab.1 Carbon metabolic diversity index of rhizosphere soil of winter wheat seedlings by different treatments

生长时间	处理	香农系数 H	丰富度 S	均匀度 E	生长时间	处理	香农系数 H	丰富度 S	均匀度 E
3 周	CK	3.273 ± 0.041	30.667 ± 0.577^{Aa}	0.953 ± 0.005^{Aa}	3 周	CK	3.273 ± 0.041^A	30.667 ± 0.577^A	0.953 ± 0.005^A
	T1	3.282 ± 0.032	29.000 ± 1.000^a	0.965 ± 0.003^{ABb}		T6	3.243 ± 0.011	28.333 ± 0.882^A	0.957 ± 0.001^a
	T2	3.284 ± 0.023	28.333 ± 1.528	0.966 ± 0.008^B		T7	3.217 ± 0.018^{Ba}	26.333 ± 1.202^A	0.964 ± 0.009
	T3	3.273 ± 0.042	27.000 ± 1.000^{Bb}	0.982 ± 0.003^C		T8	3.264 ± 0.027^b	28.667 ± 0.882^B	0.973 ± 0.003^{Bb}
	T4	3.286 ± 0.052	27.667 ± 2.082^b	0.967 ± 0.008^B		T9	3.269 ± 0.006^{Ab}	29.667 ± 0.333^A	0.970 ± 0.002^a
	T5	3.278 ± 0.021	26.333 ± 1.528^{Bb}	0.981 ± 0.002^C		T10	3.246 ± 0.010^a	28.333 ± 0.667^A	0.971 ± 0.004
7 周	CK	3.276 ± 0.019	29.000 ± 0.577^{Aa}	0.963 ± 0.001^{Aa}	7 周	CK	3.276 ± 0.019^{Aa}	29.000 ± 0.577^a	0.963 ± 0.001^{Aa}
	T1	3.273 ± 0.007	28.000 ± 0.577^a	0.975 ± 0.008^b		T6	3.216 ± 0.017^b	27.333 ± 0.667	0.991 ± 0.001^B
	T2	3.272 ± 0.015	26.000 ± 0.577^{Bb}	0.972 ± 0.009^b		T7	3.248 ± 0.006^{Aab}	25.667 ± 0.333^b	0.983 ± 0.005^{Cb}
	T3	3.250 ± 0.011	27.000 ± 0.577^b	0.986 ± 0.005^{Bc}		T8	3.235 ± 0.022^{Aab}	26.333 ± 0.882	0.989 ± 0.005^{Cc}
	T4	3.274 ± 0.013	26.333 ± 0.333^{Bb}	0.983 ± 0.002^{Bc}		T9	3.239 ± 0.012^{Aab}	25.333 ± 1.856^b	0.984 ± 0.013^C
	T5	3.260 ± 0.037	27.000 ± 0.577^b	0.978 ± 0.002^B		T10	3.149 ± 0.026^{Bc}	27.000 ± 1.155	0.982 ± 0.031^C
12 周	CK	3.270 ± 0.022^a	29.667 ± 0.577^A	0.971 ± 0.003^A	12 周	CK	3.270 ± 0.022	29.667 ± 0.577^a	0.971 ± 0.003
	T1	3.246 ± 0.041	27.000 ± 1.000^{Ba}	0.985 ± 0.001^A		T6	3.244 ± 0.001	28.333 ± 0.882	0.970 ± 0.011
	T2	3.255 ± 0.053	27.000 ± 1.000^B	0.977 ± 0.003^B		T7	3.217 ± 0.019	26.333 ± 1.202^b	0.984 ± 0.009
	T3	3.242 ± 0.025	26.000 ± 1.000^B	0.984 ± 0.001^C		T8	3.264 ± 0.027	28.667 ± 0.882	0.973 ± 0.003
	T4	3.257 ± 0.026	26.000 ± 1.000^{BC}	0.988 ± 0.004^D		T9	3.243 ± 0.026	28.333 ± 0.667	0.969 ± 0.002
	T5	3.205 ± 0.022^b	25.333 ± 0.577^C	0.996 ± 0.002^D		T10	3.231 ± 0.014	28.000 ± 0	0.968 ± 0.004

注:同一生长时间下同列不同大写字母表示 0.01 水平显著,不同小写字母表示 0.05 水平显著。

征与幼苗生长 3 周时相同。

Pb-Cd 处理下,冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性指数与 Cd 处理时不同,幼苗生长 3 周

时,香农系数较对照和 Cd 处理降低;丰富度指数亦较对照显著降低,但与 Cd 处理相比,50.0 和 80.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Pb 增强了相应 Cd 的抑制效应,而其他

含量的 Pb 则减缓了 Cd 的抑制效应;均匀度指数较对照增高,且除 $180.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外,其他 Pb-Cd 处理均较相应 Cd 处理降低。7 周时,香农系数和丰富度指数均较对照和 Cd 处理降低;而均匀度指数较对照和 Cd 处理增高。12 周时,香农系数较对照和 Cd 处理降低,且除 $80.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外,其他 Pb-Cd 处理下的香农系数较 Cd 处理增大;而丰富度指数较对照降低,但较 Cd 处理增高;此外,除 $80.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外,其他 Pb-Cd 处理下均匀度指数均较对照和 Cd 处理降低。总体来看,低于 $350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Pb 明显影响 Cd 处理下冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性指数的变化特征,且主要表现为增强效应。

2.3 不同处理下根际土壤微生物聚类分析

对不同处理进行吸光度聚类分析,其结果如图 2 所示。Cd 处理下,幼苗生长 3 周时,根际土壤微生物共聚为 3 类,其中 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 处理与对照聚为一类, $70.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 单独聚为一类,其他处理聚为一类;7 周时,亦聚为 3 类,但与 3 周时不

同; 10.0 和 $50.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 聚为一类, $20.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 单独聚为一类,其他处理聚为一类;12 周时,根际土壤微生物聚类结果与 3 周和 7 周时不同;对照和 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 处理各单独聚为一类,其他处理聚为一类。

Pb-Cd 处理与 Cd 处理聚类结果明显不同,幼苗生长 3 周时,根际土壤微生物共聚为 2 类,其中 $180.0 \sim 50.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $230.0 \sim 70.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Pb-Cd 与对照聚为一类,其他处理聚为一类;7 周和 12 周时,根际土壤微生物共聚为 3 类,对照和 $230.0 \sim 70.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Pb-Cd 各单独聚为一类,其他处理聚为一类。由此可看出,低于 $350.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Pb 对 Cd 处理下冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性特征影响明显。

2.4 不同处理下根际土壤微生物代谢功能多样性与根系分泌物的关系

根系分泌物测定结果已于另文发表^[9],由表 2 可知,幼苗生长 3 周时,Cd 处理下酚酸和简单糖类的分泌量与根际土壤微生物代谢功能多样性的关系不显著;7 周时,Cd 处理下酚酸分泌量和香农系数呈显著 ($p < 0.05$) 负相关,简单糖类分泌量与丰富度呈极显著 ($p < 0.01$) 正相关,而与均匀度呈显著 ($p < 0.05$) 负相关;12 周时,酚酸和简单糖类分泌量与香农系数呈显著 ($p < 0.05$) 负相关。

表 2 不同条件下冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性与根系分泌物的相关性

Tab. 2 The correlation between the carbon metabolic diversity of rhizosphere soil microorganisms and the content of exudates from winter wheat seedling roots by different treatments

生长时间	处理	项目	丰富度	香农系数	均匀度
3 周	Cd	酚酸	0.047	0.117	0.020
		简单糖类	-0.075	-0.056	0.140
	Pb-Cd	酚酸	-0.635**	-0.449*	0.610**
		简单糖类	0.111	-0.096	-0.232
7 周	Cd	酚酸	-0.182	-0.415*	0.213
		简单糖类	0.619**	0.117	-0.536*
	Pb-Cd	酚酸	0.191	0.540*	0.087
		简单糖类	-0.214	-0.164	0.101
12 周	Cd	酚酸	-0.360	-0.466*	0.268
		简单糖类	-0.234	-0.425*	0.289
	Pb-Cd	酚酸	0.470	0.310	-0.334
		简单糖类	0.207	0.173	-0.003

注:“**”表示 $p < 0.01$ 水平显著,“*”表示 $p < 0.05$ 水平显著。

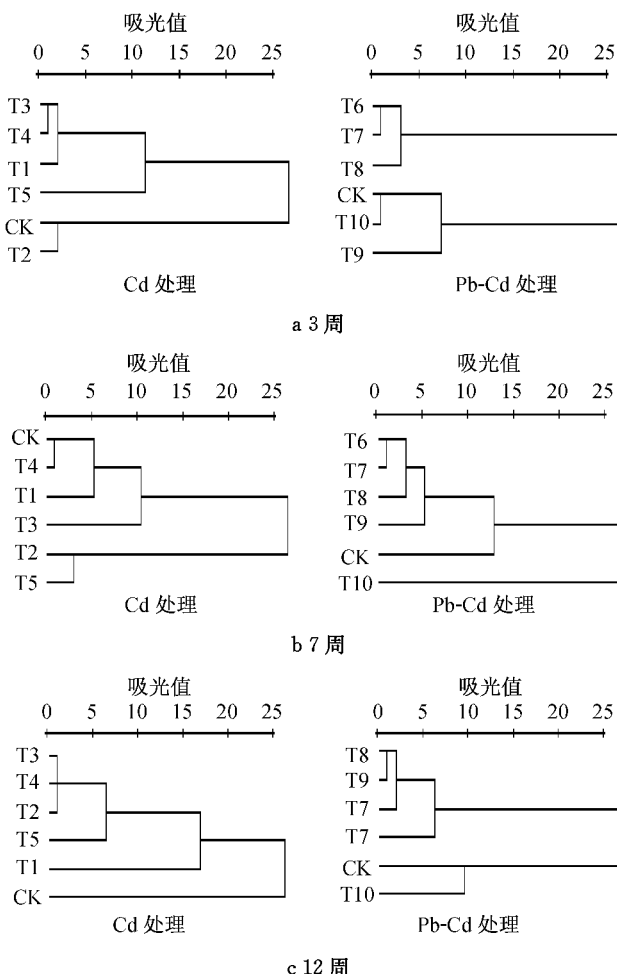


图 2 不同处理下 31 种碳源吸光值聚类分析

Fig. 2 Cluster diagram of absorbance of 31 carbon sources by different treatments

Pb-Cd 处理下,幼苗生长 3 周时,根系酚酸分泌量和微生物代谢功能多样性指数显著相关,且与丰富度指数和香农系数的相关方向与 Cd 处理下相反,

简单糖类分泌量与丰富度指数和均匀度指数的相关方向亦与 Cd 处理下相反;7 周时,酚酸分泌量与香农系数呈显著($p < 0.05$)正相关,且与丰富度指数和香农系数的相关方向与 Cd 处理下相反,而简单糖类分泌量与丰富度和均匀度指数相关性不再显著,且相关方向与 Cd 处理下相反;12 周时,酚酸和简单糖类分泌量与微生物代谢功能多样性指数的相关性不显著,但相关方向与 Cd 处理下相反.上述结果表明低于 $350.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Pb 会显著影响 Cd 处理下冬小麦根际土壤微生物代谢功能多样性和根系分泌物之间的关系特征.

3 讨论

尽管众多研究表明低含量 Pb 对植物生长等未表现出明显影响^[5-6],但当与 Cd 共存时却表现出影响植物生长的效应^[4].而本研究亦表明,低含量 Pb (质量分数小于 $350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 主要表现出显著增强 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤微生物群落结构的影响,这与 Pb 对植物根系生长及分泌物的影响有关.如有研究表明,Pb 可刺激艾叶草根系伸长和生物量增加及大量须根的形成^[10].这种现象亦会出现于冬小麦根系生长中,而根系生物量的增加或降低均会引起根系分泌物定性和定量的改变,根系分泌物又是影响根际土壤微生物活性和群落结构的主要因素^[11-12].其中碳水化合物会以碳源形式刺激微生物增殖,酚类化合物会以化感作用方式抑制其增殖.如酚酸以化感抑制物而存在,则会掩盖简单糖类物质对微生物的碳源刺激作用^[13],从而引起微生物利用不同碳源能力的差异性.同时根系分泌物的定性及定量变化还会改变根际土壤微环境 pH 值.如采用水培法研究表明,Pb 的存在可使小麦根际 pH 值升高,而 Cd 处理则使小麦根际 pH 值降低^[14].根际 pH 值的改变亦会影响微生物生长增殖及群落动态和结构特征.而 Pb-Cd 处理下冬小麦幼苗生长的不同阶段,其根系分泌物的定性和定量变化与 Cd 处理下明显不同,且简单糖类物质的分泌量较单独 Cd 处理下显著降低^[9].表明低含量 Pb 对 Cd 污染下冬小麦幼苗根系分泌物行为产生了重要的影响,进而直接影响其根际土壤微生物群落代谢多样性特征.因而在幼苗生长各时期,低含量 Pb 表现出加强 Cd 对根际土壤微生物群落的影响效应. Pb-Cd 处理下酚酸类和简单糖类物质与微生物代谢功能多样性指数间的相关性和相关方向与 Cd 处理下明显不同,表

明 Pb-Cd 处理下冬小麦幼苗根系分泌物的种类及其对根际土壤微生物的作用方式与 Cd 处理下不同,这与低含量 Pb 的存在有着极大关系,而这也同时表明微生物受到了低含量 Pb 的影响,聚类结果也说明了这点;此外,低含量 Pb 对根际土壤微生物群落结构及代谢活性的直接影响亦不可避免.

另外,本研究表明土壤 Pb 含量低于国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)规定的 II 类土壤环境基准值范围时,仍会明显影响 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤微生物群落结构的影响,而根际土壤微生物群落代谢功能多样性的变化会影响根际土壤微生态系统的稳定性和稳定性,最终关系到冬小麦根际土壤养分转化与根系对养分的利用率等.尽管土壤重金属污染多以单一重金属为主,但当有低含量的其他重金属存在时是否加重或减轻其对植物生长发育及土壤生态功能的影响是一亟需研究的问题,正如本研究结果显示,即使低于国家基准值的 Pb 仍会明显改变 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤微生物群落的影响特征,如亦有研究表明低于环境标准的 Pb 对油菜、荆芥等的生长表现出一定的抑制作用^[15].因此,在制定土壤环境质量关于重金属基准值或阈限值时,应该考虑复合污染和单污染对作物生物学功能、适用作物种类及土壤微生物学功能等问题,对于同一类作物分别应有单一污染和复合污染时的基准值.此外,亦应该考虑土壤生态功能所能承载的最大和最小污染量,以及地区降水量、土壤类型和结构及其理化特征等众多因素在重金属对土壤生态功能影响特征中的作用.这些因素对于作物安全生产、土壤环境质量保护,以及维持良好的农田土壤生态系统和土壤可持续生产力具有重要意义.

4 结论

(1) Pb 含量低于国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)规定的 II 类土壤环境基准值(每 kg 干土 350 mg , $\text{pH} > 7.5$)时,主要表现为增强 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤微生物利用不同碳源能力的抑制效应.

(2) 低含量 Pb 会显著影响 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性指数的变化特征,且主要表现为加强效应.

(3) 冬小麦幼苗根际土壤微生物代谢功能多样性指数与根系酚酸和简单糖类分泌量之间的相关性特征在低含量 Pb-Cd 处理与 Cd 处理之间明显不同,

且相关方向和显著性水平均发生了改变。

参考文献:

- [1] 崔岩山,陈晓晨.土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 403.
CUI Yanshan, CHEN Xiaochen. Bioaccessibility of soil cadmium and its health risk assessment[J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 403.
- [2] Renella G, Mench M D, van der Lelie D, et al. Hydrolase activity, microbial biomass and community structure in long-term Cd-contaminated soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(3): 443.
- [3] Liao Y C, Chien S W, Wang M C, et al. Effect of transpiration on Pb uptake by lettuce and on water soluble low molecular weight organic acids in rhizosphere[J]. Chemosphere, 2006, 65(2): 343.
- [4] 张新慧,王霞霞,张恩和. 2,4-二叔丁基苯酚对啤酒花根际土壤微生物数量的化感效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1606.
ZHANG Xinhui, WANG Xiaxia, ZHANG Enhe. Allelopathic effect of phenol 2,4-bis(1,1-dimethylethyl) on microorganism of *Humulus lupulus* L. (hops) rhizospheric soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1606.
- [5] 吴萼,徐宁,温美娟. 磷钼酸-磷钨酸盐比色法测定土壤中总酚酸含量[J]. 环境化学, 2000, 19(1): 67.
WU E, XU Ning, WEN Meijuan. The measurement of total phenolic acids in soil by phosphomolybdic-phosphotungstic acid phenol reagent colorimetry[J]. Environmental Chemistry, 2000, 19(1): 67.
- [6] 冯文婷. 哀牢山常绿阔叶林土壤简单糖类和氨基酸研究——地上凋落物、地下碳输入和植物养分吸收对其的影响[D]. 昆明:中国科学院西双版纳热带植物园, 2007.
FENG Wenting. Soil simple sugars and Amino Acids in an evergreen forest of ailao mountains: effects of above-ground litterfall, below-ground carbon inputs and plant nutrient uptake [D]. Kunming: Xishuangbanna Tropical Botanical Garden of Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [7] Rogers B F, Tate III R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(10): 1389.
- [8] 邵元元,王志英,邹莉,等. 百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 819.
SHAO Yuanyuan, WANG Zhiying, ZOU L, et al. Effects of chlorothalonil on soil microbial communities of *Larix* artificial shelter-forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 819.
- [9] 贾夏,董岁明,周春娟. Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4052.
JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan. Effects of Cd, low concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4052.
- [10] Batish D R, Singh H P, Pandher J K, et al. Phytotoxic effect of Parthenium residues on the selected soil properties and growth of chickpea and radish[J]. Weed Biology and Management, 2002, 2(2): 73.
- [11] Baudoin E, Benizri E, Guckert A. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(9): 118.
- [12] Kumpiene J, Guerri G, Landi L, et al. Microbial biomass, respiration and enzyme activities after in situ aided phytostabilization of a Pb- and Cu-contaminated soil [J]. Ecotoxicology and Environment Safe, 2009, 72(1): 115.
- [13] Mao J, Yang L Z, Shi Y M, et al. Crude extract of a stragalus mongolicus root inhibits crop seed germination and soil nitrifying activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 201.
- [14] 林琦,陈英旭,陈怀满,等. 小麦根际铅、镉的生态效应[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 634.
LIN Qi, CHEN Yingxu, CHEN Huaiman, et al. The ecological effects of Pb and Cd on the root activities of wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 634.
- [15] 赵勇,李红娟,魏婷婷,等. 土壤、蔬菜的铅污染相关性分析及土壤铅污染阈值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 843.
ZHAO Yong, LI Hongjuan, WEI Tingting, et al. Relationship between soil Pb pollution and Pb contents in vegetables and pollution threshold of soil Pb[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 843.